第 37 卷第 14 期 生 态 学 报 Vol.37,No.14
2017 年 7 月 ACTA ECOLOGICA SINICA Jul.,2017

DOI: 10.5846/stxb201604220760
秦伟, 曹文洪,郭乾坤,于洋,殷哲.植被格局对侵蚀产沙影响的研究评述.生态学报,2017,37(14):4905-4912.
Qin W, Cao W H, Guo Q K, Yu Y, Yin Z.Review of the effects of vegetation patterns on soil erosion and sediment yield.Acta Ecologica Sinica,2017,37(14):4905-4912.

植被格局对侵蚀产沙影响的研究评述

秦 伟[1,2,*],曹文洪[1,2],郭乾坤[1,2],于 洋[1,2],殷 哲[1,2]
1 中国水利水电科学研究院,流域水循环模拟与调控国家重点实验室,北京 100048
2 水利部水土保持生态工程技术研究中心,北京 100048

摘要:土壤侵蚀是人类可持续发展的重要挑战,植被重建则是防控侵蚀产沙的有效手段。在当前水土资源日益稀缺的新形势下,优化植被布局将成为黄土高原等生态脆弱地区未来阻蚀减沙、改善环境的重要途径,有关植被格局对侵蚀产沙影响的科技需求更加急迫、意义更加重要。为此,从坡面与流域两个尺度,总结评述了侵蚀产沙研究中的植被格局表征、侵蚀产沙对植被格局的变化响应两个议题的研究进展。分析认为,目前主要存在缺乏反映侵蚀产沙过程的植被格局表征指数、较少考虑植被与地形叠置格局对侵蚀产沙的耦合影响、尚未建立侵蚀产沙对植被格局的直观响应关系等问题。为促进有关研究,今后在格局指数和耦合关系的构建中应重视植被和地形对侵蚀产沙过程的耦合影响,并选用具有良好应用精度的分布式物理成因模型,以获得反映植被格局影响的流域侵蚀产沙结果。同时,可通过采用 GIS 空间分析技术,设计获得更多的典型植被格局及对应情景的侵蚀产沙,以丰富基础资料,减少信息干扰。

关键词:植被格局;侵蚀产沙;景观格局指数;源-汇理论;水文联通性

Review of the effects of vegetation patterns on soil erosion and sediment yield

QIN Wei[1,2,*], CAO Wenhong[1,2], GUO Qiankun[1,2], YU Yang[1,2], YIN Zhe[1,2]
1 *State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100048, China*
2 *Research Center on Soil and Water Conservation of the Ministry of Water Resources, Beijing* 100048, *China*

Abstract: Soil erosion is one of the main challenges to sustainable development that human beings face. Vegetation reconstruction can play an important role in controlling soil erosion and reducing sediment yield. Given that soil and water resources are becoming increasingly scarce, optimizing the vegetation distribution pattern would undoubtedly be helpful in resolving such problems, as well as in environmental improvement of ecologically fragile regions such as the Loess Plateau. Hence, there is an urgent need to elucidate the effects of vegetation distribution pattern on soil erosion and sediment yield. Keeping this in mind, this study has summarized and reviewed the progress in research on both the slope and the watershed scale on the following two issues: the characterization of vegetation patterns in soil erosion and sediment yield research, and the response of soil erosion and sediment yield to the changes in vegetation patterns. The following problems were identified following the analysis: 1) vegetation pattern metrics that can characterize the effects of soil erosion and sediment yield are still lacking; 2) the coupled effects of vegetation patterns and landforms on soil erosion and sediment yield are rarely studied; and 3) the intuitive response of soil erosion and sediment yield to the vegetation pattern has not been established. In order to promote relevant research, studies on the combined effects of vegetation patterns and landforms on soil erosion and sediment yield should be emphasized in the future, and distributed physical models with high practical accuracy should

基金项目:国家自然科学基金项目(31200535;41501091);中国科协"青年人才托举工程(2015-2017 年度)"项目
收稿日期:2016-04-22; **网络出版日期**:2017-03-02

* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: qinwei_office@ sina.com

be used to obtain data on soil erosion and sediment yield, which would reflect the impact of vegetation patterns. In addition, GIS spatial analysis technology should be adopted to design more typical vegetation patterns and study the corresponding soil erosion and sediment yield, which could enrich the basic information available and reduce the presence of not relevant or inaccurate information.

Key Words: vegetation patterns; soil erosion and sediment yield; landscape pattern metrics; source-sink theory; hydrological connectivity

土壤侵蚀是当今世界土壤资源面临的十大威胁之一[1]。尤其水力侵蚀,占全球侵蚀总面积近 70%,不仅使水土资源和碳氮元素流失、土壤质量下降,还造成泥沙淤积与水体污染,促发旱涝和山洪灾害,严重制约人类社会发展。植被通过地上冠层拦截降雨、地下根系固土促渗以及地表覆盖阻缓径流的综合作用,具有明显的阻蚀减沙作用。作为景观重要组分,除植被类型、数量决定侵蚀产沙外,其格局、分布也同侵蚀产沙关系密切,且较大空间尺度下格局的影响更为显著[2]。目前,有关植被类型和数量与侵蚀产沙的关系相对清晰,但限于"格局-过程"这一地学和生态领域前沿问题的复杂性,以及侵蚀产沙变化中多因素耦合作用的特点,植被格局的侵蚀产沙影响仍不明确[3],导致生态脆弱区植被建设面临主要依靠增加种植面积和覆盖比例阻蚀减沙,却难通过优化布局提升水土保持功能和效益的不利局面。

植被格局与侵蚀产沙的关系具有空间尺度依存性[4],现有报道主要针对坡面、流域两个尺度,具体涉及如何定量表征植被格局特征?不同植被格局下的侵蚀产沙是何变化?等科学问题。为此,本文从坡面与流域两个尺度、格局表征与耦合关系两个方面,回顾总结相关成果,分析提出存在的主要问题和对策,以期促进植被格局对侵蚀产沙影响的基础研究,尽快强化流域水土保持植被格局优化的理论与技术支撑。

1 侵蚀产沙研究中的植被格局表征

研究植被格局对侵蚀产沙的影响,首先需解决如何表征其格局特征的问题。作为一种景观类型,植被格局与景观格局一样通常指大小和形状不一的植被单元在一定空间范围内的排列与配置。由于侵蚀产沙过程主要存在坡面和流域两个空间域,因此相关研究也相应涉及坡面和流域两个空间尺度下的植被格局表征(表 1)。

1.1 坡面植被格局表征

坡面范围较小,地形条件和植被类型相对均一,因此对坡面植被格局主要关注植被斑块的几何形状、镶嵌结构和分布位置等。研究中常按斑块形状、分布密度和均匀程度给予定性描述,再对比分析不同格局分布对应的侵蚀产沙变化。如 Ludwig 等[5-6]研究了破碎和集中、带状和点状等植被分布的侵蚀产沙变化;Boer 等[8]对比了植被聚集单一与离散镶嵌分布下的侵蚀产沙差异。在我国黄土高原地区的坡面侵蚀产沙研究中,常以随机、聚集、带状等分布状态描述植被格局[7,9],并关注相同类型和数量的植被在上、中、下等不同坡位分布所引起的水土流失变化[10-12,22]。

已有坡面侵蚀产沙研究中,对植被格局主要是依据斑块分布方式和位置的定性描述,缺乏定量表征,导致各类侵蚀产沙模型中通常缺少反映植被格局影响的量化参数,并使得有关研究多停留在不同分布方式的侵蚀产沙强度变化层面,未能深入揭示导致变化的作用机制。

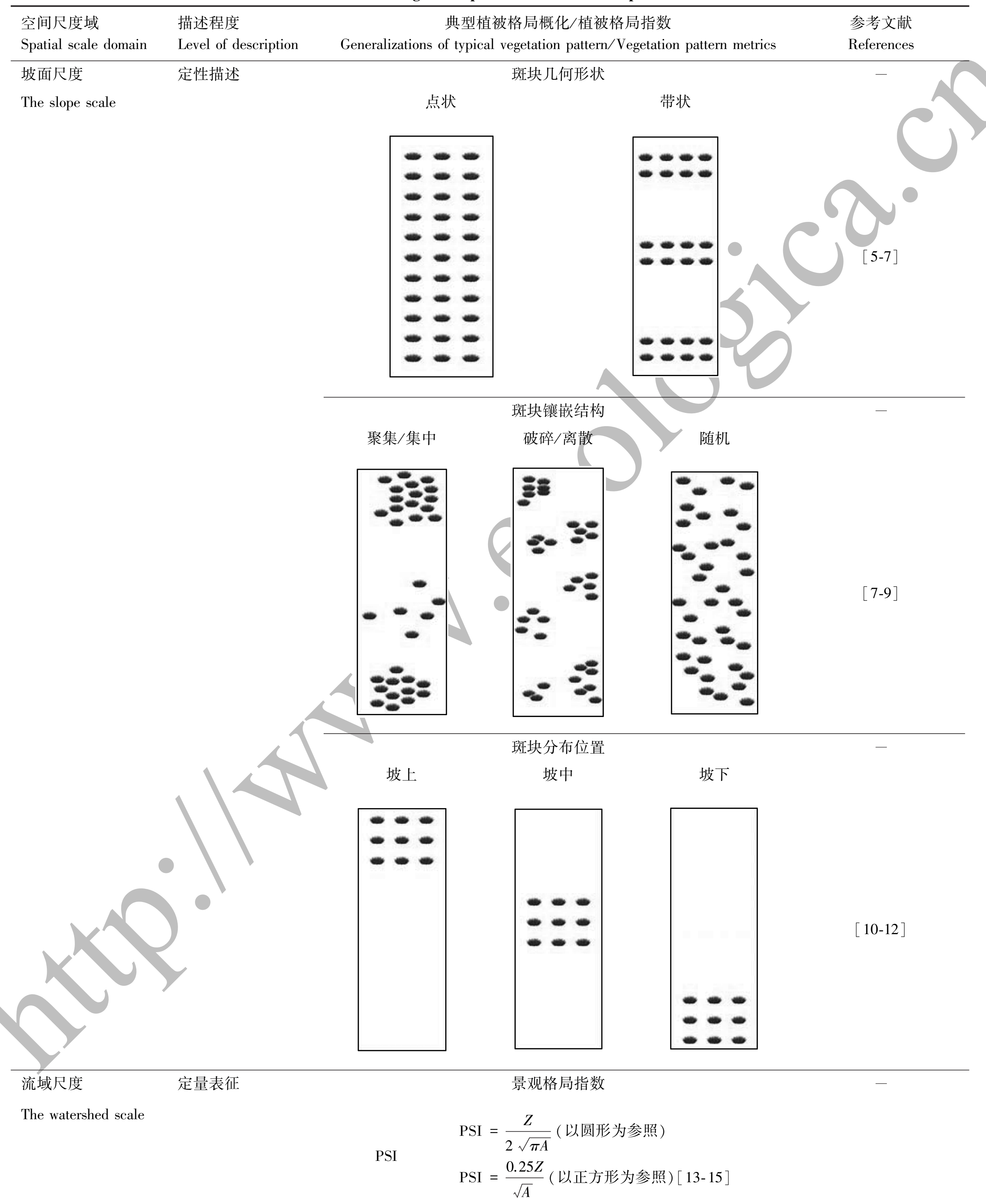
1.2 流域植被格局表征

流域范围内,随空间尺度扩大,植被种类和斑块数量更加丰富,镶嵌组合结构更加复杂多变,反而难以简洁、直观的定性描述其格局特征。为此,在流域植被格局对侵蚀产沙影响的早期研究中,主要采用传统景观指数表征植被格局。研究发现,包括植被斑块镶嵌结构与边界形状是影响流域泥沙输移比的关键指标[13-14],而斑块聚落密度和多样性指数则与半干旱区的流域产沙呈良好负相关[15]。在我国黄土高原地区,景观层次上

包括植被在内的土地利用斑块聚集度、连接度、丰富度和平均面积是影响水土流失的主要格局指标,类型层次

表 1　坡面与流域尺度植被格局表征

Table 1　The characterization of vegetation patterns on bath the slope and the watershed scale



空间尺度域 Spatial scale domain	描述程度 Level of description	典型植被格局概化/植被格局指数 Generalizations of typical vegetation pattern/Vegetation pattern metrics	参考文献 References
坡面尺度 The slope scale	定性描述	斑块几何形状 点状　带状	— [5-7]
		斑块镶嵌结构 聚集/集中　破碎/离散　随机	— [7-9]
		斑块分布位置 坡上　坡中　坡下	— [10-12]
流域尺度 The watershed scale	定量表征	景观格局指数 PSI　$PSI = \frac{Z}{2\sqrt{\pi A}}$ (以圆形为参照) $PSI = \frac{0.25Z}{\sqrt{A}}$ (以正方形为参照)[13-15]	—

续表

空间尺度域 Spatial scale domain	描述程度 Level of description	典型植被格局概化/植被格局指数 Generalizations of typical vegetation pattern/Vegetation pattern metrics		参考文献 References
		ED	$ED = \frac{P}{A} \cdot 10^6$	[16-17]
		PD	$PD = \frac{n}{A}$	
		SHDI	$\mathrm{SHDI} = \sum_{i=1}^{m} [R_i \ln(R_i)]$	
		AI	$AI = [1 + \sum_{i=1}^{m} \sum_{j=1}^{n} \frac{P_{i,j} \ln(P_{i,j})}{2\ln(m)}] \cdot 100$	
		PCI	$\mathrm{PCI} = [1 - \frac{\sum_{j=1}^{n} z_{i,j}}{\sum_{j=1}^{n} z_{i,j} \cdot \sqrt{a_{i,j}}}] \cdot [1 - \frac{1}{\sqrt{n}}]$	
		PR	$PR = m$	
		MPS	$\mathrm{MPS} = \frac{A}{n} \cdot 10^6$	
		LPI	$\mathrm{LPI} = \frac{\mathrm{Max}(a_1, a_2 \cdots a_n)}{A} \cdot 100$	
		PFD	$\mathrm{PFD} = 2 \cdot \ln(\frac{Z}{k}) / \ln(A)$	
			“源-汇“分布	—
		LWLCI	$\mathrm{LWLCI} = \frac{\sum_{i=1}^{x} A_{Yi} W_i}{\sum_{j=1}^{y} A_{Hj} W_j}$	[16-17]
			水文联通	—
		DLI	$\mathrm{DLI} = 1 - [\frac{L_{\max} - L_{cal}}{L_{\max} - L_{\min}}]^k$	[19]
		MFLI	$\mathrm{MFLI}_{i,j} = \sqrt{\Delta H_{i,j}^2 + \Delta L_{i,j}^2}$	[20]
		IC	$IC = \log(\frac{W_k S_k \sqrt{A_k}}{\sum_{i=1}^{n} \frac{d_i}{W_i S_i}})$	[21]

PSI:斑块形状指数 Patch shape index;ED:边界密度 Edge density;PD:斑块密度 Patch density;SHDI:香农多样性指数 Shannon′s diversity index;AI:斑块聚集度 Aggregation index;PCI:斑块连接度 Patch cohesion index;PR:斑块丰富度 Patch richness;MPS:平均斑块面积 Mean patch area;LPI:最大斑块指数 Largest patch index;PFD:斑块分维数 Patch fractal dimension;LWLCI:景观空间负荷对比指数 Location-weighted landscape contrast index;DLI:方向性渗透系数 Directional leakiness index;MFLI:平均汇流路径长度指数 Mean flow length index;IC:水文联通性指数 Index of connectivity;Z:斑块周长; A:斑块总面积;P:斑块总周度; n:斑块数;R_i:第 i 类斑块面积占景观总面积的比例; m: 斑块类型数; $P_{i,j}$: 随机选择的两个相邻斑块属于类型 i 与 j 的概率;$z_{i,j}$:像元斑块周长;$a_{i,j}$:像元数表示的斑块面积; $\mathrm{Max}(a_1, a_2, \cdots, a_n)$: 景观中的最大斑块面积; k:常数;A_{Yi}、A_{Hj}:分别为第 i 种“源”景观和第 j 种“汇”景观的面积累积曲线组成的不规则三边形面积;x:共 x 种“源”景观类型; y:共 y 种“汇”景观类型;L_{ca1}:沿水流方向、基于逐步累积汇流算法确定的景观渗透值; $L_{\min}$、$L_{\max}$:分别表示植被盖度为 100%和 0 时的最小景观渗透值和最大景观渗透值;$\mathrm{MFLI}_{i,j}$:i 点至 j 点的汇流路径长度指数;ΔH:i,j 两点间的高程差;ΔL:i,j 两点间的水平距离,在 8 向流算法下,流向 1、4、16、64 时, 取值为像元边长,流向 2、8、32、128 时,取 1.414 倍像元边长;W_k:上坡贡献区域平均权重因子;S_k:上坡贡献区域平均坡降;A_k:上坡贡献区面积;d_i:第 i 个像元至下坡最近泥沙沉积位置的汇流长度;W_i:第 i 个像元的位置权重;S_i:第 i 个像元的坡降

上草地斑块连接度和分维数变异度等与侵蚀产沙关系甚密[16]。随着研究深入,改变流域水文联通性进而决定泥沙剥离-搬运-沉积过程被认为是植被格局影响流域侵蚀产沙的重要原因[23-24]。由于传统景观指数难有效反映这一过程,基于源-汇理论的景观格局指标和基于水沙输移的水文联通性指标被提出:Ludwig 等[19]把坡面裸地和植被斑块分别视作侵蚀产沙的“源”与“汇”,将两者的欧氏距离定义为方向性渗透指数

(Directional leakiness index,DLI);陈利顶等[18]通过计算景观斑块累积面积比例随其与流域出口相对距离、高度和坡度增大的洛伦兹曲线,设计出跨尺度的景观空间负荷对比指数(Location-weighted landscape contrast index,LWLCI),用以反映不同景观格局的水土流失和面源污染风险;Mayor 等[20]将坡面裸地单元作为产沙"源",植被单元或地形洼地作为产沙"汇",再计算各单元至最近"汇"的汇流距离,以平均汇流路径长度指数(Mean flow length index,MFLI)反映植被格局的阻蚀减沙能力;Borselli 等[21]将坡面单元的水沙输移分解为上部水沙向其汇集和该单元向最近沉积区输移两个过程,选用坡度、植被盖度因子、上坡汇流面积、下坡汇流长度等因子确定上述过程的输出概率,提出了水文联通性指数(Index of connectivity,IC),用以表征一定地形和下垫面条件下的流域水沙输移潜力。

纵观已有研究,由于矢量植被覆盖数据是在无海拔和坡降差异的虚拟水平地表的垂直投影[25],因此单独基于这类数据计算的传统景观指数仅能刻画景观斑块及其镶嵌组合在水平投影面的几何特征,缺乏与水土流失过程联系[26],无法表征植被与地形叠置格局改变水文联通性进而对侵蚀产沙的影响[2,27]。现有各类基于源-汇理论的格局指数虽在一定程度上考虑了植被和地形对上部单元产沙向流域出口输移的影响,但忽略了植被和地形共同改变径流水蚀能量进而决定下部单元侵蚀事实[28],且景观类型"源"、"汇"划分及其对侵蚀产沙变化贡献的量化还缺乏理想方法,很大程度限制了其应用效果。水文联通性指数在计算单元上部产沙和下部输沙概率时,采用对应路径内所有单元的植被覆盖因子和汇流面积算数均值,仅体现植被数量影响,难以反映植被分布尤其与地形叠加的耦合作用,且指数本身是否与流域产沙存在良好关系尚无报道证实。

2 侵蚀产沙对植被格局的变化响应

研究植被格局对侵蚀产沙的影响,关键是确定不同植被格局下的侵蚀产沙变化响应关系。由于不同空间尺度下,水土流失的主要影响因素及其作用机制不同[4],因此研究侵蚀产沙的植被格局变化响应须对应具体尺度域。与侵蚀产沙过程的尺度域对应,现有报道主要涉及坡面和流域两个空间尺度。

2.1 坡面侵蚀产沙的植被格局变化响应

坡面尺度研究发现,相同覆盖率的植被同裸地镶嵌分布时的侵蚀产沙强于其均一分布[8];同是与裸地镶嵌时,植被破碎、细化、带状分布则分别较集中、粗化、点状分布更利于阻蚀减沙[5-6],或者说植被斑块密度越大侵蚀产沙越少[15]。若采用基于源-汇景观理论建立的方向性渗透指数[19]和平均汇流路径长度指数[20]表征植被格局特征时,则两个指数均与植被覆盖度、破碎度等呈负指数相关,而与侵蚀产沙呈正相关。在我国黄土高原地区,大量报道认为,相同降雨或上坡来水时,同样类型和盖度的植被分布在下坡的侵蚀产沙小于中坡和上坡[10-12,22],而带状、聚集、随机等植被分布的侵蚀产沙则依次减少[7,9]。

坡面尺度可控性较好,通过下垫面设计能消除降水、土壤以及坡度、坡向等某些地形因素的空间分异,在理论上能观测确定出侵蚀产沙与植被格局间较直观、明确的变化响应关系。然而,由于缺乏有效的植被格局特征及其与侵蚀产沙过程关系的表征参数,导致现有研究多数只给出了不同植被分布与侵蚀产沙变化的逻辑关系,而非数量关系。

2.2 流域侵蚀产沙的植被格局变化响应

流域尺度,当包括植被的景观斑块均匀分布时,侵蚀产沙年际变化较小,反之波动增大,且景观格局对侵蚀产沙的影响随空间尺度变化,小流域坡位分布格局影响显著,大流域坡度分布格局影响更大[29]。为进一步揭示侵蚀产沙的植被格局变化响应,一些研究分别采用 RUSLE(Revised Universal Soil Loss Equation)[30]、LISEM(Limburg Soil Erosion Model)[31]、WEPP(Water Erosion Prediction Project)[32]等模型,用来模拟不同景观格局的流域产沙。另有一些研究则尝试建立格局指数与侵蚀产沙的关系(表 2):在水蚀风蚀交错区的西柳沟流域,不同时期土地利用的常规景观格局指数经与同期输沙量进行相关分析,结果发现蔓延度指数的增加或者最大斑块指数、香农多样性指数的减少将具有抑制流域产沙的作用[33];12 个常规景观指数被用于表征黄河上游龙羊峡至刘家峡段的土地利用格局,并与基于 SWAT(Soil and Water Assessment Tool)模拟的河道输沙

分析,发现草地斑块密度和分形维数等景观指数与流域产沙呈较显著负相关[34];方向性渗透指数[19]被用来表征丹江口水库上游景观格局,并与 12 个子流域实测输沙模数分析,发现该指数与流域平均景观阻滞、平均植被覆盖度呈显著负指数相关,而与流域年均输沙模数呈显著正指数相关[35];景观空间负荷对比指数[18]经局部改进后用于表征长江上游黑水和镇江关流域景观格局,并与基于 RUSLE(Revised Universal Soil Loss Equation)和 SEDD(Sediment Delivery Distributed Model)模拟的流域产沙分析,结果表明不考虑降雨变化时,该指数与流域年际产沙呈良好正相关,可解释 98%的产沙变化[27];面积比例、植被盖度、斑块密度、形状指数和坡位指数被用以表征黄土高原小流域人工林地空间分布,并与基于 CSLE(Chinese Soil Loss Equation)计算的流域侵蚀强度进行多元相关分析,发现林地斑块密度和形状指数越大的小流域侵蚀强度量高,而坡位指数反之[36];斑块平均临近指数、面积加权形状因子和分形指数被用以表征黄土区小流域林地格局特征,并与流域形状指数、林地面积比例、次降雨量、洪峰流量等指标综合构建了小流域次降雨输沙统计模型,形式上给出了植被格局与侵蚀产沙的定量耦合关系[37],但因采用常规景观指数,无法反映植被格局对侵蚀产沙过程影响,因此 55%的检验数据误差超过 25%,尚难以实际应用。

表 2 流域尺度植被格局指数与侵蚀产沙的关系

Table 2 The relationships between soil erosion and sediment yield with vegetation pattern metrics

植被格局指数 Vegetation pattern metrics	植被格局指数与侵蚀模数(E)/输沙模数(S)的关系 Relationships between vegetation pattern metrics with modulus of soil erosion or sediment yield	复相关系数 Determination coefficient	参考文献 References
GPD	$E=-6033.5 \cdot GPD^2+829.88 \cdot GPD-24.141$	$R^2=0.878^*$	[34]
GLPI	$E=0.0362 \cdot GLPI^2-3.5028 \cdot GLPI+86.966$	$R^2=0.947^*$	
GED	$E=0.0858 \cdot GED^2-3.3048 \cdot GED+34.097$	$R^2=0.910^*$	
GSI	$E=0.0027 \cdot GSI^2-0.6124 \cdot GSI+36.976$	$R^2=0.898^*$	
GSDI	$E=45.066 \cdot GSI^2-155.41 \cdot GSI+136.31$	$R^2=0.965^*$	
GFRAC	$E=25937 \cdot GFRAC^2-55421 \cdot GFRAC+29608$	$R^2=0.984^*$	
GPAFD	$E=-513.7 \cdot GPAFD^2+1476.3 \cdot GPAFD-1055.9$	$R^2=0.744^*$	
DLI	$S=1104.8 \cdot DLI^{1.2503}$	$R^2=0.624^*$	[35]
MLWLCI	$S=0.2 \cdot MLWLCI+0.1$	$R^2=0.980^*$	[27]
WAR WPD WSI WVC WSPI	$E=74.49-10.25 \cdot WAR-35.03 \cdot WPD-10.97 \cdot WSI-0.43 \cdot WVC+14.33 \cdot WSPI$	$R^2=0.333^*$	[36]
WPAWAFD	$S = 95.87 \cdot e^{(0.014 \cdot N+0.051 \cdot P f_i)} \cdot \frac{(I_{30} \cdot P)^{0.436}}{WPAWASI^{0.364} \cdot WANI^{0.327} \cdot WPAWAFD^{0.446} \cdot WAR^{0.213}}$	–	[37]

E:流域侵蚀模数,t/hm^2;S:流域输沙模数,t/km^2;GPD:草地斑块密度 Grassland patch density;GLPI:草地最大斑块指数 Grassland largest patch index;GED:草地边界密度 Grassland edge density;GSI:草地形状指数 Grassland shape index;GSDI:草地形状分布指数 Grassland shape distribution index;GFRAC:草地分形分布指数 Grassland fractal distribution index;GPAFD:草地周长-面积分形维数 Grassland perimeter-area fractal dimension;MLWLCI:改进的景观空间负荷比指数 Modified location-weighted landscape contrast index;WAR:林地面积比例 Woodland area proportion;WPD:林地斑块密度 Woodlands patch density;WSI:林地形状指数 Woodlands shape index;WVC:林地植被盖度 Woodland vegetation coverage;WSPI:林地坡位指数 Woodland slope position index;WPAWAFD:林地斑块面积加权平均分形指数;Woodlands patch area weighted average fractal dimension;N:洪水径流输移能力;P:次降雨量。mm;f_i:流域形状系数,即流域面积与长度之比;I_{30}:流域内次暴雨中心最大 30min 降雨强度,mm/30min;WPAWASI:林地斑块面积加权平均性状指数 Woodlands patch area weighted average shape index;WANI:林地平均邻近指数 Woodlands average neighboring index;*:表示关系显著;—:模型误差较大

纵观已有研究,借助实测资料或模型模拟,许多报道已能够确定流域尺度不同景观格局的侵蚀产沙通量变化,但多未定量解析侵蚀产沙对植被格局的响应关系。对于尝试建立景观指数与侵蚀产沙关系的研究,限于传统景观指数缺乏与水土流失过程联系,即使相互存在显著统计关系,仍是模糊与不确定的[38],因此基于这类指数的研究势必难以在作用机制方面获得清楚认知。同时,借助预报模型获得不同植被格局侵蚀产沙的

报道多采用 RUSLE 等统计模型,限于统计模型未对侵蚀产沙变化中的植被格局贡献,尤其是植被与地形叠置格局的耦合影响给与有效参数量化,预报结果本身无法完整反映侵蚀产沙的植被格局变化响应[28,39],因此基于这种模拟方法的研究也势必难以在耦合关系建立方面获得明显突破。

3 讨论与结论

在当前人口增长、资源短缺、气候变化的背景下,生态脆弱地区一方面需改善植被覆盖以阻蚀减沙、改善环境,另一方面又需提高土地产出、保障粮食安全,并协调行业与区域水土资源利用占比[40]。尤其在我国水土流失严重、水资源短缺的黄土高原,这种两难境遇导致水土保持植被建设面临突出的林-水矛盾和林-地矛盾[41]。加之过去数十年大规模生态治理已使该区多数地方的植被覆盖较 20 世纪 80 年代增加 80%以上,在近十余年黄河输沙减少中发挥近 60%积极贡献的同时[42],也遭遇土壤干层、植被退化等生态问题[43-44]。因此,在水土资源更加稀缺的新形势下,黄土高原未来持续增加植被面积的潜力将十分有限,优化植被布局必然成为控制侵蚀产沙、改善生态环境的主要出路,有关植被格局对侵蚀产沙影响的科技需求更加急迫、意义更加重要。

在有关植被格局对侵蚀产沙影响的研究中,提出有效表征植被格局特征是基础,建立植被格局与侵蚀产沙变化耦合关系是关键。纵观现有报道,一方面仍缺乏良好反映侵蚀产沙过程影响的植被格局指数,尤其是完整表征植被与地形叠置格局对侵蚀、产沙耦合影响的格局指数;另一方面,尚未建立流域侵蚀产沙与植被格局变化的直观响应关系,难以为面向阻蚀减沙目标的植被格局优化提供有力支撑。因此,构建基于水土流失过程的植被格局指数以及定量描述植被格局与侵蚀产沙变化响应关系的耦合模型是“景观格局-生态过程关系“前沿科学议题未来的重要内容[18,26]。

为突破现有研究中的不足,建议今后关注以下问题:

(1)无论从源-汇景观理论还是侵蚀动力过程的角度,都认为植被格局对流域尺度侵蚀产沙的影响主要在于改变水文联通性,进而影响侵蚀、搬运和沉积过程。在流域地貌系统内,不同植被格局的水文联通性除直接决定于植被斑块及其镶嵌组合的几何构形外,还同植被斑块与地形单元的叠置格局有关,两方面共同影响产汇流过程及其侵蚀、搬运能力,最终改变侵蚀产沙强度与分布。充分认识这一耦合作用过程是深入揭示植被格局对流域侵蚀产沙影响的关键。为此,在设计植被格局表征指数时,可在主要针对植被的景观指数中增加反映地形因素影响的参数因子,也可在主要针对地形的特征指标中增加反映植被因素影响的参数因子。如笔者通过在基于上坡汇流面积的坡长因子算式中增加反映植被覆盖影响的汇流面积贡献率,提出的考虑上坡植被与地形耦合影响的坡长因子[30],该指标即可在一定程度反映植被与地形叠置格局对侵蚀产沙的影响。

(2)基于模型模拟获得不同植被格局下的流域侵蚀产沙是构建两者直观耦合关系的有效途径。然而,现有报道通常采用的经验统计模型并未包含量化植被格局对侵蚀产沙影响的有效参数,以其侵蚀产沙计算结果为基础则势必难以获得良好耦合关系。因此,今后应选用具有良好应用精度的分布式物理成因模型,以获得反映植被格局影响的流域侵蚀产沙。同时,通过采用 GIS 空间分析技术,人为设计获得多种典型植被格局,再基于模型模拟对应情景的侵蚀产沙,不仅能较较单纯依靠实际土地利用与水文资料的传统方法获得更加丰富的样本资料,还能有效减少干扰,更利于耦合关系研究。

参考文献(References):

[1] Food and Agriculture Organization of the United Nations. Status of the World's Soil Resources. Washington, DC: FAO, 2015.
[2] Van Rompaey A, Krasa J, Dostal T. Modelling the impact of land cover changes in the Czech Republic on sediment delivery. Land Use Policy, 2007, 24(3): 576-583.
[3] Fu B J, Zhao W W, Chen L D, Liu Z F, Lü Y H. Eco-hydrological effects of landscape pattern change. Landscape and Ecological Engineering, 2005, 1(1): 25-32.
[4] 傅伯杰, 陈利顶, 王军, 孟庆华, 赵文武. 土地利用结构与生态过程. 第四纪研究, 2003, 23(3): 247-255.
[5] Ludwig J A, Wilcox B P, Breshears D D, Tongway D J, Imeson A C. Vegetation patches and runoff-erosion as interacting ecohydrological processes

in semiarid landscapes. Ecology, 2005, 86(2): 288-297.
[6] Ludwig J A, Bartley R, Hawdon A A, Abbott B N, McJannet D. Patch configuration non-linearly affects sediment loss across scales in a grazed catchment in north-east Australia. Ecosystems, 2007, 10(5): 839-845.
[7] 李强, 李占斌, 鲁克新, 游珍. 黄土丘陵区不同植被格局产流产沙试验研究. 中国农村水利水电, 2008, (4): 100-102, 104-104.
[8] Boer M, Puigdefábregas J. Effects of spatially structured vegetation patterns on hillslope erosion in a semiarid Mediterranean environment: a simulation study. Earth Surface Processes and Landforms, 2005, 30(2): 149-167.
[9] 沈中原. 坡面植被格局对水土流失影响的实验研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2006.
[10] 游珍, 李占斌, 蒋庆丰. 植被在坡面的不同位置对降雨产沙量影响. 水土保持通报, 2006, 26(6): 28-31.
[11] 丁文峰, 李勉. 不同坡面植被空间布局对坡沟系统产流产沙影响的实验. 地理研究, 2010, 29(10): 1870-1878.
[12] 卫伟, 贾福岩, 陈利顶, 吴东平, 陈瑾. 黄土丘陵区坡面水蚀对降雨和下垫面微观格局的响应. 环境科学, 2012, 33(8): 2674-2679.
[13] Slattery M C, Burt T P. Particle size characteristics of suspended sediment in hillslope runoff and stream flow. Earth Surface Processes and Landforms, 1997, 22(8): 705-719.
[14] Takken I, Beuselinck L, Nachtergaele J, Govers G, Poesen J, Degraer G. Spatial evaluation of a physically-based distributed erosion model (LISEM). Catena, 1999, 37(3/4): 431-447.
[15] Bautista S, Mayor Á G, Bourakhouadar J, Bellot J. Plant spatial pattern predicts hillslope runoff and erosion in a semiarid Mediterranean landscape. Ecosystems, 2007, 10(6): 987-998.
[16] 王计平, 杨磊, 卫伟, 陈利顶, 黄志霖. 黄土丘陵区景观格局对水土流失过程的影响——景观水平与多尺度比较. 生态学报, 2011, 31(19): 5531-5541.
[17] 邬建国. 景观生态学:格局、过程、尺度与等级. 北京: 高等教育出版社, 2007.
[18] 陈利顶, 傅伯杰, 徐建英, 巩杰. 基于"源-汇"生态过程的景观格局识别方法——景观空间负荷对比指数. 生态学报, 2003, 23(11): 2406-2413.
[19] Ludwig J A, Eager R W, Bastin G N, Chewings V H, Liedloff A C. A leakiness index for assessing landscape function using remote sensing. Landscape Ecology, 2002, 17(2): 157-171.
[20] Mayor Á G, Bautista S, Small E E, Dixon M, Bellot J. Measurement of the connectivity of runoff source areas as determined by vegetation pattern and topography: a tool for assessing potential water and soil losses in drylands. Water Resources Research, 2008, 44(10): W10423.
[21] Borselli L, Cassi P, Torri D. Prolegomena to sediment and flow connectivity in the landscape: a GIS and field numerical assessment. Catena, 2008, 75(3): 268-277.
[22] 陈利顶, 贾福岩, 汪亚峰. 黄土丘陵区坡面形态和植被组合的土壤侵蚀效应研究. 地理科学, 2015, 35(9): 1176-1182.
[23] Bracken L J, Croke J. The concept of hydrological connectivity and its contribution to understanding runoff-dominated geomorphic systems. Hydrological Processes, 2007, 21(13): 1749-1763.
[24] Masselink R J H, Keesstra S D, Temme A J A M, Seeger M, Giménez R, Casalí J. Modelling discharge and sediment yield at catchment scale using connectivity components. Land Degradation & Development, 2016, 27(4): 933-945.
[25] 刘宇, 吴炳方, 曾源, 张磊. 耦合过程和景观格局的土壤侵蚀水环境影响评价. 应用生态学报, 2013, 24(9): 2581-2589.
[26] 傅伯杰, 徐延达, 吕一河. 景观格局与水土流失的尺度特征与耦合方法. 地球科学进展, 2010, 25(7): 673-681.
[27] Yang M, Li X Z, Hu Y M, He X Y. Assessing effects of landscape pattern on sediment yield using sediment delivery distributed model and a landscape indicator. Ecological Indicators, 2012, 22: 38-52.
[28] 秦伟, 曹文洪, 左长清. 植被与地形对侵蚀产沙耦合影响研究评述. 泥沙研究, 2015, (3): 74-80.
[29] 史纪安. 土地利用空间分布格局对侵蚀产沙过程的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2003.
[30] 秦伟, 曹文洪, 左长清, 朱清科, 张晓明. 考虑沟-坡分异的黄土高原大中流域侵蚀产沙模型. 应用基础与工程科学学报, 2015, 23(1): 12-29.
[31] 傅伯杰, 邱扬, 王军, 陈利顶. 黄土丘陵小流域土地利用变化对水土流失的影响. 地理学报, 2002, 57(6): 717-722.
[32] Yu X X, Zhang X M, Niu L L. Simulated multi-scale watershed runoff and sediment production based on GeoWEPP model. International Journal of Sediment Research, 2009, 24(4): 465-478.
[33] 王金花, 李占斌, 张荣刚, 姚文艺. 水蚀风蚀交错区流域景观格局变化及水沙响应关系. 中国水土保持科学, 2016, 14(3): 68-75.
[34] Ouyang W, Skidmore A K, Hao F H, Wang T J. Soil erosion dynamics response to landscape pattern. Science of the Total Environment, 2010, 408(6): 1358-1366.
[35] 刘宇, 吴炳方, 曾源, 张磊. 耦合过程和景观格局的土壤侵蚀水环境影响评价. 应用生态学报, 2013, 24(9): 2581-2589.
[36] 姚文俊, 张岩, 朱清科. 小流域林地空间分布对土壤侵蚀的影响——以陕北吴起县为例. 中国水土保持科学, 2015, 13(1): 16-22.
[37] 余新晓, 秦富仓. 流域侵蚀动力学. 北京: 科学出版社, 2007.
[38] Tischendorf L. Can landscape indices predict ecological processes consistently?. Landscape Ecology, 2001, 16(3): 235-254.
[39] 傅伯杰, 赵文武, 陈利顶, 吕一河, 王德. 多尺度土壤侵蚀评价指数. 科学通报, 2006, 51(6): 1936-1943.
[40] 夏军, 孙雪涛, 谈戈. 中国西部流域水循环研究进展与展望. 地球科学进展, 2003, 18(1): 58-67.
[41] 王彦辉, 熊伟, 于澎涛, 沈振西, 郭明春, 管伟, 马长明, 叶兵, 郭浩. 干旱缺水地区森林植被蒸散耗水研究. 中国水土保持科学, 2006, 4(4): 19-25, 32-32.
[42] Wang S, Fu B J, Piao S L, Lü Y H, Ciais P, Feng X M, Wang Y F. Reduced sediment transport in the Yellow River due to anthropogenic changes. Nature Geoscience, 2016, 9(1): 38-41, doi: 10.1038/NGEO2602.
[43] 李玉山. 黄土高原森林植被对陆地水循环影响的研究. 自然资源学报, 2001, 16(5): 427-432.
[44] 穆兴民, 徐学选, 王文龙, 温仲明, 杜峰. 黄土高原人工林对区域深层土壤水环境的影响. 土壤学报, 2003, 40(2): 210-217.